

Solar cell appts.

Publication number: DE4416549 (A1)

Publication date: 1995-11-30

Inventor(s): LEHMANN VOLKER DIPL ING DR [DE] +

Applicant(s): SIEMENS AG [DE] +

Classification:


- **international:** *H01L31/0352; H01L31/068; H01L31/18; H01L31/0248; H01L31/06; H01L31/18; (IPC1-7): H01L31/036; H01L31/0224; H01L31/042; H01L31/18*

- **European:** H01L31/0352C3; H01L31/068; H01L31/18C


Application number: DE19944416549 19940510


Priority number(s): DE19944416549 19940510


Also published as:


 DE4416549 (C2)

Cited documents:

 DE2835246 (A1)

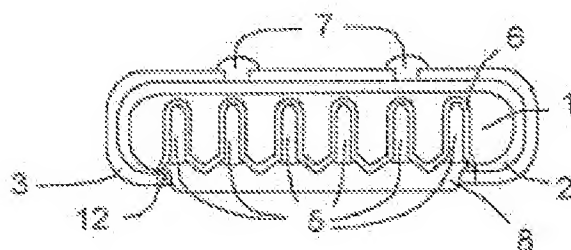
 DE2723620 (A1)

 US5258077 (A)

 JP5984479 (A)

Abstract of DE 4416549 (A1)

The appts. includes a monocrystalline semiconductor body (1) with a PN junction, and a positive n-type doped region (2') upper main side upon which significant light falls. In the semiconductor body a radiation transparent electrode (7) lies on the upper surface of the n-type doped region. Opposite to the light incident main surface is a lower surface (12) with depressions (5) reaching into the semiconductor body. A positive p-type doped region (6) follows along the surface of the depressions in the lower main surface such that the pn-junction has a folded shape. A further electrode (8) is deposited the lower surface. Pref. the depressions are formed as pores in the second surface, with spacing max. equal to the diffusion length in the semiconductor body.



Data supplied from the **espacenet** database — Worldwide



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 44 16 549 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁶:
H 01 L 31/036
H 01 L 31/0224
H 01 L 31/042
H 01 L 31/18

②1 Aktenzeichen: P 44 16 549.8
②2 Anmeldetag: 10. 5. 94
④3 Offenlegungstag: 30. 11. 95

DE 44 16 549 A 1

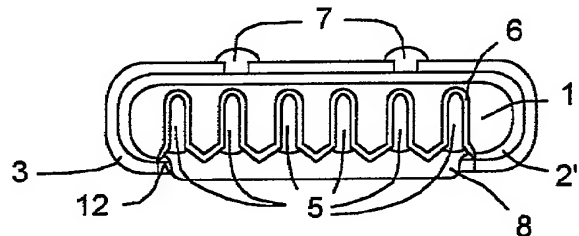
⑦1 Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:
Lehmann, Volker, Dipl.-Ing. Dr., 80689 München, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Solarzelle und Verfahren zu deren Herstellung

⑤7 Eine Solarzelle umfaßt einen monokristallinen Halbleiterkörper (1) mit einem pn-Übergang, mit einem n⁺-dotierten Gebiet (2'), das an eine erste Hauptfläche (11) angrenzt, über die der Lichteinfall im wesentlichen erfolgt und auf der eine strahlungsdurchlässige erste Elektrode (7) angeordnet ist, mit Vertiefungen (5), die von einer zweiten, der ersten gegenüberliegenden Hauptfläche (12) in den Halbleiterkörper hineinreichen, mit einem p⁺-dotierten Gebiet (6), das entlang der Oberfläche der Vertiefungen (5) gefaltet ist, so daß der pn-Übergang gefaltet ist, und mit einer auf der zweiten Hauptfläche (12) angeordneten zweiten Elektrode. Insbesondere werden die Vertiefungen als Poren (5) ausgebildet, deren Abstand kleiner oder gleich der Diffusionslänge im Halbleiterkörper (1) ist und die in Silizium durch elektrochemisches Ätzen hergestellt werden.



DE 44 16 549 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 10. 95 508 048/46

7/30

Der Wirkungsgrad von Solarzellen mit einem monokristallinen Halbleiterkörper mit einem pn-Übergang hängt sowohl von der Lichtabsorption als auch von der Rekombination von Ladungsträgern im Halbleiterkörper sowie an dessen Oberfläche ab. Bei der Lichtabsorption werden Ladungsträgerpaare erzeugt, die im elektrischen Feld der Raumladungszone des pn-Übergangs getrennt werden. Durch vorzeitige Rekombination von Ladungsträgern gehen diese für die Stromerzeugung verloren. Rekombination von Ladungsträgern findet vor allem im Bereich von Kristallfehlern und von Oberflächen statt. Ein Maß für die Rekombination von Ladungsträgern im Volumen ist die Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger im Kristall. Eine große Diffusionslänge bedeutet einen qualitativ hochwertigen Kristall, in dem wenig Rekombination von Ladungsträgern auftritt. Eine kleine Diffusionslänge dagegen bedeutet hohe Rekombinationsrate.

Die Rekombination an der Oberfläche des Halbleiterkörpers wird insbesondere bei Halbleiterkörpern aus monokristallinem Silizium, durch eine Passivierungsschicht reduziert. Es hat sich gezeigt (siehe zum Beispiel High efficiency silicon solar cells, Ed. M. A. Green, Trans Tech Publications 1987, Seite 116), daß die Passivierung einer Siliziumoberfläche, die n^+ -dotiert ist, effektiver als die Passivierung einer Oberfläche, die p^+ -dotiert ist, erfolgen kann. Als Passivierungsschicht ist dabei zum Beispiel SiO_2 geeignet.

Solarzellen mit guter Oberflächenpassivierung auf der Lichteinfallseite werden daher aus einem p-dotierten Halbleiterkörper hergestellt, der auf der dem Lichteinfall zugewandten Oberfläche ein n^+ -dotiertes Gebiet aufweist. Die Tiefe des n^+ -dotierten Gebietes wird so dimensioniert, daß der größte Teil des Lichts im Bereich des aus n^+ -dotiertem Gebiet und p-dotiertem Halbleiterkörper gebildeten pn-Übergang absorbiert wird und damit hauptsächlich in diesem Bereich Ladungsträgerpaare gebildet werden. Im Bereich der Raumladungszone des pn-Übergangs werden die Ladungsträgerpaare getrennt und tragen zum Solarstrom bei. Ein Teil des Lichtes dringt tiefer in den Halbleiterkörper ein und wird erst dort unter Bildung von Ladungsträgerpaaren absorbiert. Diese Ladungsträgerpaare diffundieren im Halbleiterkörper mit zufälliger Richtung bis sie in den Bereich des elektrischen Feldes der Raumladungszone gelangen und getrennt werden oder bis sie durch Rekombination verlorengehen. Damit auch diese Ladungsträger zum Solarstrom beitragen wird für Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad ein Halbleiterkörper mit großer Diffusionslänge verwendet. Diese Halbleiterkörper sind jedoch wegen der erforderlichen Kristallgüte teuer.

Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, eine Solarzelle anzugeben bei der auch bei Verwendung von Halbleiterkörpern mit geringerer Diffusionslänge ein hoher Wirkungsgrad erzielt wird. Ferner liegt der Erfindung das Problem zugrunde, ein Herstellungsverfahren für eine solche Solarzelle anzugeben.

Dieses Problem wird erfindungsgemäß gelöst durch eine Solarzelle nach Anspruch 1 sowie ein Verfahren zu deren Herstellung nach Anspruch 6. Weitere Ausgestaltungen der Erfindung gehen aus den übrigen Ansprüchen hervor.

Die erfindungsgemäße Solarzelle umfaßt einen monokristallinen Halbleiterkörper mit einem pn-Übergang, in den das Licht hauptsächlich über eine erste

Hauptfläche eingestrahlt wird. Im Bereich der ersten Hauptfläche weist der Halbleiterkörper ein n^+ -dotiertes Gebiet auf. Im Bereich einer zweiten Hauptfläche, die der ersten Hauptfläche gegenüberliegt, weist der Halbleiterkörper Vertiefungen auf. An die zweite Hauptfläche angrenzend ist ein p^+ -dotiertes Gebiet angeordnet, das entlang der Oberfläche der Vertiefungen in der zweiten Hauptfläche gefaltet ist. Der Halbleiterkörper ist n-dotiert, so daß der pn-Übergang entlang der Oberfläche der Vertiefungen in der zweiten Hauptfläche gefaltet ist. Diese Faltung des pn-Überganges vergrößert den Bereich des Halbleiterkörpers, in dem das elektrische Feld der Raumladungszone des pn-Überganges zur Ladungssammlung wirksam ist.

Es liegt im Rahmen der Erfindung, die Vertiefungen in Form von Poren auszubilden. Dabei ist es besonders vorteilhaft, einen Halbleiterkörper aus monokristallinem Silizium mit n-Dotierung, wobei die Dotierstoffkonzentration im Bereich zwischen 10^{16} cm^{-3} und 10^{17} cm^{-3} liegt, zu verwenden und die Poren durch elektrochemisches Ätzen in einem sauren, fluoridhaltigen Elektrolyten, mit dem die zweite Hauptfläche, in der die Poren erzeugt werden, in Kontakt gebracht wird, herzustellen.

Bei der elektrochemischen Ätzung wird zwischen den Elektrolyten und den Halbleiterkörper eine Spannung angelegt. Dabei wird der Halbleiterkörper als Anode verschaltet. Dadurch bewegen sich Minoritätsladungsträger in dem n-dotierten Silizium zu der mit dem Elektrolyten in Kontakt stehenden zweiten Hauptfläche. An der zweiten Hauptfläche bildet sich während der Ätzung eine Raumladungszone aus. Da die Feldstärke im Bereich von Vertiefungen in der zweiten Hauptfläche größer ist als außerhalb davon, bewegen sich die Minoritätsladungsträger bevorzugt zu diesen Punkten. Dadurch findet die Reaktion hauptsächlich an diesen Punkten statt. Das bewirkt eine Strukturierung der zweiten Hauptfläche.

Je tiefer eine anfänglich kleine Unebenheit durch die Ätzung wird, desto mehr Minoritätsladungsträger bewegen sich wegen der vergrößerten Feldstärke dorthin und desto stärker ist der Ätzangriff an dieser Stelle. Dadurch kommt es zur Ausbildung von tiefen Poren.

Die Poren wachsen in der kristallographischen $\langle 100 \rangle$ -Richtung. Damit die Poren senkrecht zur zweiten Hauptfläche wachsen, ist es vorteilhaft, einen Halbleiterkörper mit $\langle 100 \rangle$ -Orientierung zu verwenden.

Da der Ätzangriff beim elektrochemischen Ätzen stets am Boden der Pore erfolgt, können auf diese Weise Poren erzeugt werden, deren Tiefe erheblich größer als ihr Durchmesser ist.

Die Anordnung der Poren beim elektrochemischen Ätzen kann dadurch vorgegeben werden, daß die zweite Hauptfläche vor der elektrochemischen Ätzung gezielt mit Vertiefungen versehen wird. Dieses erfolgt zum Beispiel mit Hilfe einer Photolithographie und anschließendem alkalischen Ätzen.

Vorzugsweise werden die Poren in der zweiten Hauptfläche so angeordnet, daß benachbarte Poren einen Abstand kleiner oder gleich der Diffusionslänge des Halbleiterkörpers aufweisen. Die Tiefe der Poren wird so bemessen, daß der Abstand des Porenbodens von der ersten Hauptfläche, durch die der Lichteinfall erfolgt, kleiner oder gleich der Diffusionslänge ist. Auf diese Weise wird sichergestellt, daß praktisch der gesamte Halbleiterkörper im Einfluß des elektrischen Feldes der Raumladungszone des pn-Überganges liegt. Dadurch wird die Rekombination von Ladungsträgern im Volu-

men des Halbleiterkörpers deutlich vermindert. Auf diese Weise kann auch bei Verwendung eines Halbleiterkörpers aus geringerwertigem, monokristallinem Silizium, das Fehlstellen aufweist und das eine Diffusionslänge von 100 bis 200 μm aufweist, ein Wirkungsgrad im Bereich zwischen 12 Prozent und 17 Prozent erzielt werden.

Im folgenden wird die Erfindung anhand eines Ausführungsbeispiels und der Figuren näher erläutert.

Fig. 1 zeigt einen Halbleiterkörper mit einem n^+ -dotierten Gebiet.

Fig. 2 zeigt den Halbleiterkörper nach Abscheidung einer Passivierungsschicht.

Fig. 3 zeigt den Halbleiterkörper nach Strukturierung der Passivierungsschicht.

Fig. 4 zeigt den Halbleiterkörper nach Erzeugung von einer Oberflächentopologie im Bereich einer zweiten Hauptfläche.

Fig. 5 zeigt den Halbleiterkörper nach Bildung von Poren durch elektrochemisches Ätzen.

Fig. 6 zeigt den Halbleiterkörper nach Erzeugung einer strahlungsdurchlässigen ersten Elektrode auf einer ersten Hauptfläche und einer zweiten Elektrode auf der zweiten Hauptfläche.

Zur Herstellung der Solarzelle wird als Halbleiterkörper 1 zum Beispiel eine Scheibe aus n -dotiertem, monokristallinem Silizium mit zum Beispiel $<100>$ -Orientierung und folgenden Abmessungen: Dicke: 0,5 mm, Durchmesser: 10 cm bis 15 cm verwendet. Der Halbleiterkörper 1 weist eine Dotierstoffkonzentration von zum Beispiel 10^{16} cm^{-3} auf. Der Halbleiterkörper 1 hat eine Diffusionslänge von 100 bis 200 μm . Der Halbleiterkörper 1 weist eine erste Hauptfläche 11 und eine dieser gegenüberliegende zweite Hauptfläche 12 auf (siehe Fig. 1). Durch die erste Hauptfläche 11 erfolgt im Betrieb der wesentliche Lichteinfall.

An der gesamten Oberfläche des Halbleiterkörpers 1 wird eine n^+ -dotierte Schicht durch Eindiffusion hergestellt. In der n^+ -dotierten Schicht 2 wird eine Dotierstoffkonzentration von zum Beispiel 10^{20} cm^{-3} eingestellt. Die n^+ -dotierte Schicht weist eine Ausdehnung senkrecht zur Oberfläche des Halbleiterkörpers 1 von zum Beispiel 0,5 μm auf.

Anschließend wird ganz flächig eine Passivierungsschicht 3 aufgebracht (siehe Fig. 2). Die Passivierungsschicht 3 besteht zum Beispiel aus einer 5 nm dicken SiO_2 -Schicht, die auf der Oberfläche der n^+ -dotierten Schicht 2 angeordnet ist, und einer 75 nm dicken Si_3N_4 -Schicht. Die Passivierungsschicht 3 wirkt als rekombinationsarmer Belag im Bereich der ersten Hauptfläche 11 sowie als Antirefektionsschicht.

Unter Verwendung einer photolithographisch hergestellten Photolackmaske (nicht dargestellt) wird durch Ätzen in HF die Passivierungsschicht 3 im Bereich der zweiten Hauptfläche 12 strukturiert (siehe Fig. 3).

Durch alkalisches Ätzen zum Beispiel mit KOH, wobei die strukturierte Passivierungsschicht 3 als Maske wirkt, wird die zweite Hauptfläche 12 mit einer Oberflächentopologie versehen. Die Oberflächentopologie 4 umfaßt eine Vielzahl von Unebenheiten, die an solchen Orten angeordnet sind, an denen später Poren erzeugt werden sollen. Die Unebenheiten der Oberflächentopologie 4 werden so tief geätzt, daß die n^+ -dotierte Schicht 2 durchätzt wird.

Anschließend wird die zweite Hauptfläche 12 des Halbleiterkörpers 1 mit einem Elektrolyten in Kontakt gebracht. Der Elektrolyt ist fluoridhaltig und sauer. Er enthält eine Flußsäurekonzentration von 1 bis 50 Ge-

wichtsprozent, vorzugsweise 4 Gewichtsprozent. Dem Elektrolyten kann ein Oxidationsmittel, zum Beispiel Wasserstoffsuperoxid, zugesetzt werden, um die Entwicklung von Wasserstoffbläschen auf der zweiten Hauptfläche 12 des Halbleiterkörpers 1 zu unterdrücken. Zwischen den Halbleiterkörper 1 und den Elektrolyten wird eine Spannung von zum Beispiel 2 Volt angelegt. Der Halbleiterkörper 1 wird über die n^+ -dotierte Schicht 2 kontaktiert. Dabei wird der Halbleiterkörper 1, der zum Beispiel einen spezifischen Widerstand von 5 $\Omega \cdot \text{cm}$ aufweist, als Anode verschaltet. Der Halbleiterkörper 1 wird von der ersten Hauptfläche 11 her beleuchtet. Durch die Beleuchtung wird bei der elektrochemischen Ätzung in dem Halbleiterkörper 1 eine Stromdichte von 0,4 mA/cm^2 eingestellt. Die Ätzung wird während etwa 6 Stunden durchgeführt. Nach dieser Ätzzeit sind in der zweiten Hauptfläche 12 des Halbleiterkörpers 1 Poren 5 entstanden, die einen Durchmesser von zum Beispiel 10 μm aufweisen. Die Tiefe der Poren 5 ist so groß, daß der Abstand zwischen dem Boden der Poren 5 und der ersten Hauptfläche 11 zum Beispiel 30 μm beträgt. Bedingt durch die Oberflächentopologie 4 beträgt der Abstand zwischen benachbarten Poren 5 60 bis 100 μm .

An der Oberfläche der Poren 5 wird zum Beispiel durch Gasphasendiffusion von Bor ein p^+ -dotiertes Gebiet 6 hergestellt. Das p^+ -dotierte Gebiet weist eine Dotierstoffkonzentration von zum Beispiel 10^{19} bis 10^{20} cm^{-3} auf. Die Tiefe des p^+ -dotierten Gebietes 6 jeweils senkrecht zur Oberfläche beträgt zum Beispiel 1 μm (siehe Fig. 5). Bei der Gasphasendiffusion wirkt die Passivierungsschicht als Maske.

Bei dem elektrochemischen Ätzen zur Bildung der Poren 5 und der anschließenden Gasphasendiffusion zur Bildung des p^+ -dotierten Gebietes 6 wird der im Bereich der zweiten Hauptfläche 12 angeordnete Teil der n^+ -dotierten Schicht 2 im wesentlichen entfernt, so daß aus der n^+ -dotierten Schicht 2 ein n^+ -dotiertes Gebiet 2' entsteht, das an die erste Hauptfläche 11 angrenzt. Zwischen dem p^+ -dotierten Gebiet 6 und dem n^+ -dotierten Gebiet 2' ist, außer an den Kanten des p^+ -dotierten Gebietes 6, das n -dotierte Ausgangsmaterial des Halbleiterkörpers 1 angeordnet.

Zur Fertigstellung der Solarzelle wird mit Hilfe einer weiteren Photolackmaske (nicht dargestellt) im Bereich der ersten Hauptfläche 11 Kontakte zu dem n^+ -dotierten Gebiet 2' geöffnet. Diese Kontaktlöcher werden mit einer strahlungsdurchlässigen ersten Elektrode 7 versehen. Die strahlungsdurchlässige erste Elektrode 7 wird zum Beispiel als strukturierte Metallschicht, vorzugsweise aus Silber oder Aluminium, gebildet.

Eine solche strukturierte Metallelektrode wird vielfach als Grid bezeichnet.

Auf der zweiten Hauptfläche 12 wird eine zweite Elektrode 8 zum Beispiel durch Siebdruck unter Verwendung einer Silberleitpaste hergestellt.

Zur Verbesserung des Reflexionsverhaltens der ersten Hauptfläche 11, durch die der wesentliche Lichteinfall in die Solarzelle erfolgt, kann die erste Hauptfläche 11 vor der Abscheidung der Passivierungsschicht 3 durch eine zusätzliche Ätzung, zum Beispiel alkalisch mit KOH, aufgeraut werden.

Um auch den Lichteinfall von am Hintergrund der Solarzelle reflektierten Lichtes über die zweite Hauptfläche 12 zu ermöglichen, kann auch die zweite Elektrode 8 strukturiert werden. Für diesen Lichteinfall ist die Solarzelle jedoch bezüglich Rekombination nicht optimiert.

1. Solarzelle

- mit einem monokristallinen Halbleiterkörper (1) mit einem pn-Übergang, 5
- mit einem n^+ -dotierten Gebiet (2'), das an eine erste Hauptfläche (11) angrenzt, über die der Lichteinfall im wesentlichen erfolgt,
- mit einer strahlungsdurchlässigen ersten Elektrode (7), die auf der Oberfläche des n^+ -dotierten Gebietes (2') angeordnet ist, 10
- mit einer zweiten Hauptfläche (12), die der ersten Hauptfläche (11) gegenüberliegt und die in den Halbleiterkörper (1) hineinreichende Vertiefungen (5) aufweist, 15
- mit einem p^+ -dotierten Gebiet (6), das entlang der Oberfläche der Vertiefungen (5) in der zweiten Hauptfläche (12) gefaltet ist, so daß der pn-Übergang gefaltet ist,
- mit einer zweiten Elektrode (8), die auf der zweiten Hauptfläche (12) angeordnet ist. 20

2. Solarzelle nach Anspruch 1,

- bei der die Vertiefungen in der zweiten Hauptfläche (12) als Poren (5) ausgebildet sind,
- bei der der Abstand benachbarter Poren (5) 25 kleiner oder gleich der Diffusionslänge im Halbleiterkörper (1) ist.

3. Solarzelle nach Anspruch 1 oder 2, bei der die erste Hauptfläche (11) mit einer Passivierungsschicht (3) versehen ist. 30

4. Solarzelle nach Anspruch 3,

- bei der der Halbleiterkörper (1) aus n-dotiertem, monokristallinem Silizium mit einer Dotierstoffkonzentration im Bereich zwischen 10^{16} cm^{-3} und 10^{17} cm^{-3} besteht, 35
- bei dem das n^+ -dotierte Gebiet (2') eine Dotierstoffkonzentration im Bereich zwischen 10^{19} cm^{-3} und 10^{20} cm^{-3} und das p^+ -dotierte Gebiet (6) eine Dotierstoffkonzentration im Bereich zwischen 10^{19} cm^{-3} und 10^{20} cm^{-3} 40 aufweisen,
- bei der die Passivierungsschicht (3) SiO_2 enthält.

5. Solarzelle nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei der die zweite Elektrode (8) strukturiert ist. 45

6. Verfahren zur Herstellung einer Solarzelle,

- bei dem ein Halbleiterkörper (1) aus n-dotiertem, monokristallinem Silizium an einer ersten Hauptfläche (11) mit einem n^+ -dotierten Gebiet (2') versehen wird, 50
- bei dem in einer zweiten, der ersten gegenüberliegenden Hauptfläche (12) durch elektrochemisches Ätzen in einem fluoridhaltigen, sauren Elektrolyten, mit dem die zweite Hauptfläche (12) in Kontakt steht und zwischen dem und dem Halbleiterkörper (1) eine elektrische Spannung so angelegt wird, daß der Halbleiterkörper (1) als Anode verschaltet ist und daß in dem Halbleiterkörper (1) eine den Ätzabtrag beeinflussende Raumdichte 60 eingestellt wird, Poren (5) erzeugt werden,
- bei dem in der zweiten Hauptfläche (12) ein p^+ -dotiertes Gebiet (6) so erzeugt wird, daß ein entlang der Oberfläche entlang der Poren (5) gefalteter pn-Übergang gebildet wird, 65
- bei dem die erste Hauptfläche (11) mit einer strahlungsdurchlässigen ersten Elektrode (7) und die zweite Hauptfläche (12) mit einer

zweiten Elektrode (8) versehen wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6,

- bei dem der Elektrolyt 1 bis 50 Gewichtsprozent Flußsäure (HF) enthält,
- bei dem der Halbleiterkörper (1) während der elektrochemischen Ätzung von der ersten Hauptfläche (11) her beleuchtet wird, um die Stromdichte im Halbleiterkörper (1) einzustellen.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, bei dem die zweite Hauptfläche (12) des Halbleiterkörpers (1) vor der elektrochemischen Ätzung mit einer Oberflächentopologie versehen wird, durch die die Anordnung der Poren (5) vorgegeben wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, bei dem das p^+ -dotierte Gebiet (6) durch Gasphasendiffusion gebildet wird.10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, bei dem der Halbleiterkörper (1) eine Dotierstoffkonzentration im Bereich zwischen 10^{16} cm^{-3} und 10^{17} cm^{-3} , das n^+ -dotierte Gebiet (2') eine Dotierstoffkonzentration zwischen 10^{19} cm^{-3} und 10^{20} cm^{-3} und das p^+ -dotierte Gebiet (6) eine Dotierstoffkonzentration zwischen 10^{19} cm^{-3} und 10^{20} cm^{-3} aufweist.

 Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

